

VARIATION SPATIALE DES FACTEURS QUI EXPLIQUENT LE VOLUME DES PRÉCIPITATIONS EN FRANCE : ANALYSE A ECHELLE LOCALE

Daniel JOLY

Université de Franche-Comté, UMR ThéMA
daniel.joly@univ-fcomte.fr

Introduction

Les précipitations, selon leur nature, peuvent être regroupées en trois types : type frontal, type convectif et type orographique. Même si, à tout moment, les précipitations des deux premières catégories peuvent être dopées par les processus orographiques, nous nous intéresserons, dans le cadre de cet article aux seuls processus orographiques. Les précipitations sont très souvent soumises à des effets locaux, et ce, d'autant plus que l'échelle temporelle est proche de l'instantané. Si, à l'échelle d'une heure (averse convective), les processus pseudo aléatoires dominent, il n'en va plus tout-à-fait de même à l'échelle d'une journée (précipitation frontale) où une forme d'organisation spatiale prend le pas sur l'aléatoire qui, toutefois subsiste plus ou moins. A l'échelle d'une décade ou d'un mois, l'aléatoire tend à disparaître car les processus orographiques, qui agissent sur le déclenchement et sur le volume des précipitations, deviennent prépondérants et dessinent des structures spatiales clairement identifiables : altitude, pente et orientation des versants sont autant de variables qui agissent sur les abats cumulés précipitations (Boubaker et Gammar, 2002 ; Carrega et Garcia, 2000, Creech et McNab, 2002, Ninyerola et al., 2000 ; Zahar et Laborde, 2000, Laborde et Traboulsi, 2002, Benichou, Lebreton, 1987 ; Humbert et al., 1998 ; Fouchier et al., 2004).

Par delà l'hétérogénéité des gradients constatés, on pourrait penser que chaque facteur agit d'une manière univoque, positive ou négative, sur le volume des précipitations. Or, l'observation fait bien souvent état de relations plus complexes. Ainsi, dans les Alpes Suisses, Frei et Schär (1998) ont établi que l'essentiel des précipitations dépend d'un effet conjugué entre pentes et positions d'abri. Dans le même contexte, Sevruck et Mieglitz (2002) ont montré que le gradient de précipitation s'inverse souvent avec l'altitude, au sud du pays surtout où on note localement de grandes différences d'une vallée à l'autre. En France, où le régime et l'organisation spatiale des pluies sont bien différents entre région méditerranéenne, frange océanique, haute et moyenne montagne, etc., des distorsions comparables sont, sans doute, à relever d'un ensemble géographique à l'autre. Pour lever cette difficulté, une méthode dite d'interpolation locale est proposée ; elle repose sur la prise en compte segmentée de l'information selon des règles de voisinage entre stations de mesure (Joly et al., 2008a ; Joly et al., 2009 ; Joly et al., 2011). Ainsi, l'ambition principale de notre travail est de tester des hypothèses sur les facteurs qui règlent la pluviosité en reconnaissant leur poids respectif. A cette fin, notre propos s'organise en trois temps : (1) la présentation des données et de la

méthodologie, (2) la comparaison des résultats, (3) et une discussion sur les problèmes posés, notamment, par les corrélations négatives qui apparaissent en plusieurs points du territoire entre altitude et précipitations.

1. DONNEES ET METHODES.

L'estimation des valeurs pluviométriques requiert deux types de données : les données de précipitation collectées dans des stations climatiques et les données géographiques spatiales décrivant l'environnement de chaque station qui serviront à élaborer des variables « candidates » susceptibles d'expliquer les précipitations. Ces variables explicatives ont été choisies en fonction de nos connaissances préalables concernant les processus qui règlent le déclenchement et l'organisation spatiale des précipitations.

1.1. Données climatiques et constitution du SIG

Les données climatiques sont collectées par Météo-France dans 2031 stations réparties sur l'ensemble du territoire français. Les tests méthodologiques présentés ici porteront uniquement sur les abats mensuels de précipitation (fig. 1). Nous utiliserons les « normales » 1971-2000.

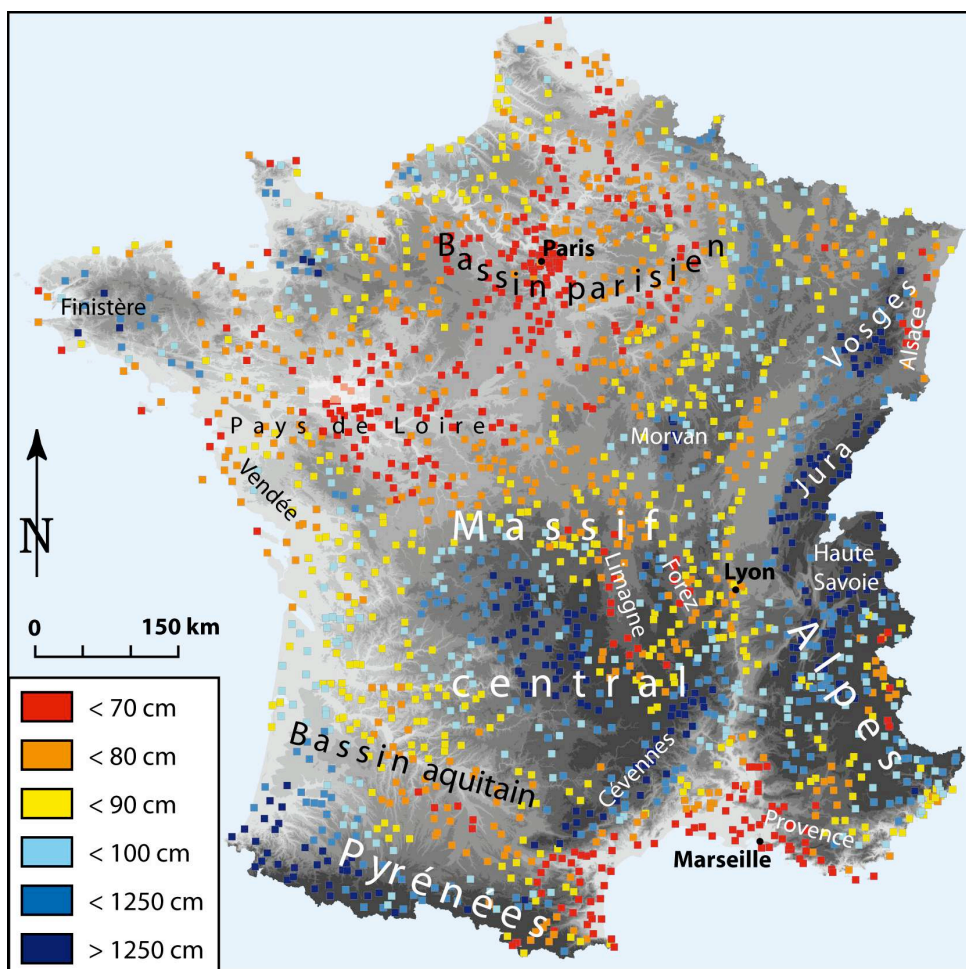


Figure 1 : Localisation des 2031 stations qui enregistrent les hauteurs de précipitation en France

Les interpolations statistiques demandent la constitution de bases de données à référence spatiale (Mitas, Mitasova, 1999). A ce titre, nous avons eu recours à des données en mode raster, couvrant le territoire à la résolution de 250 m et gérées par SIG. Deux sources ont été mobilisées. La première concerne l'occupation du sol et provient de la base européenne Corine Land Cover. Plusieurs informations en sont dérivées :

- l'indice de végétation [végét] fournit une approximation de l'abondance de la biomasse, donc de l'évapotranspiration, au voisinage des stations (Joly, 2007),
- les distances aux principaux types d'occupation du sol : distance à la forêt [Dfor] (atténuation de l'évapotranspiration) et la distance à l'océan ou à la mer le plus proche [Dmer] (atténuation des précipitations).

Le modèle numérique de terrain (MNT), distribué par l'Institut Géographique National (IGN), constitue la seconde source utilisée. Des procédures, fondées sur l'algèbre cartographique et sur la trigonométrie, permettent de créer de nouvelles variables à partir de l'information de base telles que :

- l'altitude [altit] (mesure du gradient vertical des précipitations),
- le sinus (exposition O-E) et le cosinus (exposition N-S) de l'orientation des versants (mise en évidence d'effets d'abri ou, au contraire, d'accentuation des abats pluviométriques : les versants au vent, exposés aux masses d'air humide venant de l'ouest (régions atlantiques) ou du sud (régions méditerranéennes) sont nettement plus arrosés que les versants sous le vent exposés à l'est ou au nord, abrités par les massifs ou crêtes montagneux),
- longueur du versant à l'amont de chaque pixel [lg-amont] (ouverture aux flux atmosphériques) et longueur à aval de chaque pixel [lg-aval] (confinement),
- la rugosité topographique [rugos] qui est un indicateur des irrégularités de relief (turbulence),
- la pente [pente] (peut accentuer les effets orographiques),
- L'ampleur des reliefs [Ampl-B] (ouverture aux flux atmosphériques) et la profondeur des vallées [Ampl-C] (confinement).

Au total, les 3 couches issues de Corine Land Cover et les 9 issues du MNT sont autant de variables candidates à l'explication de la variation spatiale des précipitations. L'intérêt de la démarche proposée est qu'elle procède d'une manière expérimentale pour établir le degré de significativité de ces variables et pour calibrer leur contribution aux valeurs de pluviométrie. Précisons enfin que la colinéarité existant entre des couples de variables dont le r dépasse 0.4 ont été neutralisées (Joly et al., 2009).

1.2. Méthodes d'interpolation locale

Les méthodes utilisées dans le cadre de cet article sont fondées sur les régressions (Carrega, 2003 ; Fury et Joly, 1995 ; Joly et al., 2003) et déclinées selon le mode local. Ce type d'interpolation implique de fixer, autour de chaque pixel dont on veut calculer la valeur d'estimation, une enveloppe spatiale qui contient un nombre n de stations (qui a été fixé à 30), suffisant pour calibrer le modèle local et assurer aux calculs une base statistique suffisante. Tous les pixels qui se raccordent aux mêmes 30 stations sont regroupés dans une unité spatiale appelée « polygone ». Au total, l'espace français continental est segmenté en 91 869

polygones. Chacun de ces corpus réduits, sous hypothèse de répartition homogène des stations, représentent une surface de faible extension et climatologiquement homogène.

Dans le cadre de chaque polygone qui renvoie à un corpus de 30 individus, la corrélation entre la moyenne mensuelle de précipitation (variable expliquée) et les 12 variables explicatives, est établie à l'aide d'une régression des moindres carrés ordinaires. Grâce au coefficient de corrélation (le r de Pearson), on identifie les prédicteurs significatifs au seuil de 5% ($p < 0.05$) qui sont ensuite comptabilisés en vue d'établir des fréquences. L'intérêt de recourir aux régressions locales est que la procédure décrite ci-dessus est répétée 91869 fois, de sorte que, contrairement à une régression « globale » qui porterait sur l'ensemble du corpus et ne permettrait qu'une seule régression, elle offre matière à plusieurs types de cartographie : cartographie du coefficient de corrélation, cartographie du coefficient de régression qui fournit de précieuses indications sur le gradient (par exemple gradient altitudinal si la variable explicative est l'altitude). Or ce gradient est susceptible, comme on l'a vu en introduction, de varier d'un point à l'autre du territoire français.

2. RESULTATS.

2.1. Les coefficients de corrélation

La situation est la suivante : dans le cadre de chacun des 91869 polygones, on fait 12 (abats de précipitation mensuelle = variables expliquées) * 12 (variables explicatives = altitude, pente, ...) régressions linéaires. A chaque fois, on obtient un r (précip. de janvier sur altitude, ..., précip. de décembre sur altitude ; précip. de janvier sur sinus des versants, ..., précip. de décembre sur sinus des versants ; ...). Lorsque le r est significatif, on incrémente une occurrence. A la fin du calcul, on comptabilise les occurrences obtenues en vue de mesurer la fréquence avec laquelle chacune des 12 variables explicatives expliquent les abats de précipitation mensuelle. Dans l'hypothèse où une variable serait 91869 fois significative, on pourrait en déduire que son aptitude à expliquer les abats de précipitation est maximale. Mais le r permet plus que cela. Il peut être positif ou négatif ; il peut également présenter une valeur plus ou moins élevée : 0.3 ou 0.8, ce n'est pas la même chose, même si, dans les deux cas, la valeur est significative. Aussi les fréquences seront-elles présentées sous la forme d'un tableau où les r négatifs inférieurs à -0.3 (2 classes) s'opposent aux r positifs supérieurs à 0.3 (3 classes). Les r compris entre -0.3 et 0.3 seront regroupés dans une seule classe dont il ne sera pas possible de tirer beaucoup d'enseignements (avec un r de 0.3, une variable explique 9% des abats pluviométriques, ce qui est peu).

2.1.1. Janvier

Tableau 1 : Fréquence (%) des coefficients de corrélation significatifs ; janvier

| | < -0.5 | -0.5 à -0.3 | -0.3 à 0.3 | 0.3 à 0.5 | 0.5 à 0.7 | > 0.7 |
|------------|-----------|-------------|------------|-----------|-----------|-----------|
| Altitude | 0 | 2 | 19 | 18 | 30 | 31 |
| Sinus | 0 | 7 | 90 | 3 | 0 | 0 |
| Cosinus | 0 | 7 | 88 | 5 | 0 | 0 |
| Lg-amont | 0 | 9 | 87 | 3 | 1 | 0 |
| Lg-aval | 0 | 0 | 83 | 16 | 1 | 0 |
| Rugosité | 0 | 3 | 67 | 21 | 8 | 1 |
| Pente | 3 | 10 | 71 | 12 | 4 | 0 |
| Ampl-B | 0 | 3 | 83 | 11 | 2 | 1 |
| Ampl-C | 18 | 26 | 49 | 5 | 2 | 0 |
| Ind. vég. | 2 | 16 | 80 | 2 | 0 | 0 |
| Dist-Forêt | 13 | 36 | 41 | 0 | 0 | 0 |
| Dist-Mer | 0 | 1 | 97 | 2 | 0 | 0 |

L'altitude est incontestablement la variable qui explique les abats de précipitation de janvier (tab. 1) sur la plus grande partie du territoire. La fréquence cumulée des polygones qui présente un $r < -0.3$ et > 0.3 est de 80%. L'altitude explique donc guère (ou pas du tout) les précipitations sur seulement 20% de l'espace français. De plus, le r est supérieur à 0.5 et 0.7 pour respectivement 30 et 31% des polygones. Dans ce dernier cas, l'altitude explique plus de la moitié de la variation spatiale des abats de précipitation. Les r négatifs sont peu nombreux (1%) mais posent problème tant l'altitude est spontanément, dans l'esprit de chacun, liée à un accroissement des précipitations.

L'amplitude des vallées (AmplC) et la distance à la forêt la plus proche sont les deux variables qui expliquent le plus les précipitations après l'altitude. Les r les plus fréquents sont négatifs, ce qui signifie que les précipitations sont d'autant plus faibles que les vallées sont profondes et que la forêt la plus proche est distante. Cela est conforme à ce que l'on connaît des processus qui favorisent les précipitations ; mais les cas contraires (7% des polygones présentent un abat de précipitation qui croît d'autant plus que les vallées sont profondes) sont contre intuitifs (tout comme l'étaient les r négatifs liés à l'altitude).

L'ampleur des reliefs (AmplB) est moins fréquemment significative que son homologue inverse, la profondeur des vallées. Mais les r positifs (13% > 0.3) montrent que les massifs topographiques sont bien générateurs de précipitations. La faiblesse de cette fréquence pourrait surprendre. En fait, elle doit évidemment être mise en regard avec l'extension des reliefs émergents car seuls les reliefs les plus proéminents peuvent avoir une influence sensible sur les précipitations. Cet aspect de la question concerne d'autres variables et sera discuté dans le paragraphe 2.1.3.

L'indice de végétation explique moins les précipitations que la distance à la forêt alors que le processus sous-jacent à cette variable (l'évapotranspiration pourvoyeuse d'humidité prête à condenser) est de même nature. Cet indice, calculé à l'intérieur d'une fenêtre réduite (3 * 3 pixels) est vraisemblablement trop réduite pour prendre en compte l'ensemble de la biomasse

environnante, seule à même d'expliquer les précipitations. La distance à la forêt, elle, ne présente pas ce genre de limite.

La rugosité joue un rôle favorable quand aux abats de précipitation.

Les autres variables jouent un rôle :

- soit très faible : distance amont [rôle positif], distance aval [rôle négatif] (ce qui va dans le même sens, mais avec une fréquence moindre, que l'ampleur des reliefs et des vallées), sinus et cosinus,
- soit sensible : pente, mais avec égalité entre coefficients positifs (16%) et négatifs (13%),
- soit négligeable : distance à la mer.

Tableau 2 : Fréquence (%) des coefficients de corrélation significatifs ; juillet

| ▪ | < -0.5 | -0.5 à -0.3 | -0.3 à 0.3 | 0.3 à 0.5 | 0.5 à 0.7 | > 0.7 |
|------------|-----------|-------------|------------|-----------|-----------|-----------|
| Altitude | | 0 | 19 | 23 | 28 | 30 |
| Sinus | 1 | 9 | 88 | 2 | | |
| Cosinus | | 4 | 90 | 6 | | |
| Lg-amont | 1 | 10 | 88 | 1 | | |
| Lg-aval | | | 84 | 15 | 1 | |
| Rugosité | | 3 | 78 | 14 | 3 | 1 |
| Pente | 2 | 15 | 75 | 6 | 2 | |
| Ampl-B | | 2 | 80 | 15 | 3 | |
| Ampl-C | 22 | 26 | 48 | 3 | 1 | |
| Ind. vég. | 3 | 14 | 81 | 2 | | |
| Dist-Forêt | 8 | 28 | 63 | 1 | | |
| Dist-Mer | | | 94 | 2 | 3 | 1 |

2.1.2. Juillet

En juillet, la répartition des fréquences pour chacune des 6 classes est très proche de celle de janvier. Différence notable :

- la rugosité et la distance à la forêt voient leur score concernant respectivement les $r > 0.3$ et les $r < -0.3$ baisser de 12, 13%, sans que cette désaffection se reporte sur des r de signe inverse ;
- ce qui n'est pas le cas des pentes et de l'ampleur des vallées dont la fréquence des $r > 0.3$, en diminution, se reporte sur les $r < -0.3$.

2.1.3. Statut des variables explicatives

Parmi l'ensemble des variables qui ont été introduites pour expliquer la variation spatiale des précipitations, certaines présentent des valeurs qui ont un sens partout (altitude, distance à

la forêt, à la mer). Il n'en va pas de même pour la profondeur des creux ou l'ampleur des bosses car la valeur 0 traduit ou bien l'absence de forme ou bien l'absence de quantité :

- La qualité « absence de forme positive ou négative » apparaît dans le cas de plat extensif ; l'absence de forme positive peut également apparaître sur de vastes plateaux incisés de vallées.
- En revanche, une ampleur nulle de relief positif ($\text{amplB}=0$) revêt un sens quantitatif le long des thalwegs ; la variable prenant progressivement des valeurs plus élevées à mesure qu'on se rapproche des crêtes. De même, amplC sera égal à 0 (profondeur nulle des creux) le long des crêtes et atteindra son maximum le long des thalwegs.

De fait, seulement 12% des reliefs culminent à plus de 50 m au-dessus du plan fictif joignant les parties les plus basses de l'espace environnant. Cette faible extension des reliefs les plus saillants explique sans doute l'étendue analogue (13%) des espaces concernés par un r supérieur à 0.3.

Le même calcul montre que la fréquence des vallées les plus profondes (54% d'entre elles s'inscrivent à plus de 50 m sous le plan fictif joignant les crêtes situées dans l'espace environnant) est voisine de celle des $r < -0.3$. Il y a donc concordance entre l'extension spatiale des facteurs ayant une influence sur les précipitations (reliefs d'importance, vallées suffisamment profondes) et celle où les précipitations sont influencées par eux. La fréquence moindre de $r > 0.3$ relatifs à la variable AmplB (13%) par rapport à la fréquence des $r < -0.3$ de AmplC (44%) ne peut donc pas être expliqué par l'importance moindre que la première variable aurait sur les précipitations.

2.2. Le rang

Dans le cadre de chaque polygone, une valeur de r élevée augmente la probabilité de la variable explicative qui en est créditée d'occuper le premier rang des n variables significatives. Mais ce rang d'ordre 1 peut aussi être occupé par une variable dotée d'un r peu élevé : cela se produit souvent au sein de polygones où les précipitations sont faiblement expliquées par les variables prises en compte ici. La raison peut en être une distribution peu structurée (pas totalement aléatoire car alors, tous les r seraient égaux à 0) des précipitations dans l'espace occupé par les 30 stations d'observation. L'examen du rang obtenu par chacune des 12 variables explicatives informe ainsi sur la combinaison des variables qui peuvent être sélectionnées dans les fonctions d'interpolation.

L'altitude arrive au rang 1 ou 2 dans 78% des cas (hiver comme été). Elle est suivie par l'ampleur des vallées (34% en janvier et 40% en juillet) et la distance à la forêt (26% en janvier contre 17% en juillet).

Les derniers rangs (du 9^{ième} au 12^{ième}) sont occupés par la distance à la mer (93% des cas) et la longueur amont et aval des versants (68%).

2.3. Variation spatiale du coefficient de corrélation de l'altitude

On l'a vu précédemment (section 2.1), dans l'immense majorité des cas, les r sont positifs, 30% d'entre eux étant supérieurs à 0.7. Ces valeurs élevées se répartissent sur l'ensemble des massifs montagneux et leurs marges (fig. 2) : Vosges (et Alsace), Jura, Morvan, Cantal, Sud du Massif Central (et Languedoc + Roussillon), marges ouest du Massif central. Des régions dotées d'altitudes modestes sont également concernées : Normandie, Bretagne au printemps, Lorraine, Vendée. Pour être exhaustif, on ajoutera la Provence-Côte d'Azur au printemps et en été. Dans tous ces secteurs, une élévation des altitudes entraîne à coup sûr une hausse corrélative des précipitations.

Les $r < -0.3$ concernent environ 2% des polygones localisés principalement sur les Alpes internes, le Gévaudan et le Velay, les Pyrénées orientales (sauf en été), les Landes, le Maine et Loire, l'Essonne, le Bassigny et son prolongement vers le Barrois. Ces régions se répartissent sur l'ensemble du territoire et concernent tout à la fois des montagnes et des zones de plaine, des secteurs urbanisés et ruraux. Ces coefficients négatifs posent problème car on ne voit pas bien quel processus peut expliquer une baisse des précipitations quand l'altitude s'élève. L'hypothèse qu'ils puissent découler de colinéarités locales sera discutée dans la partie 3.

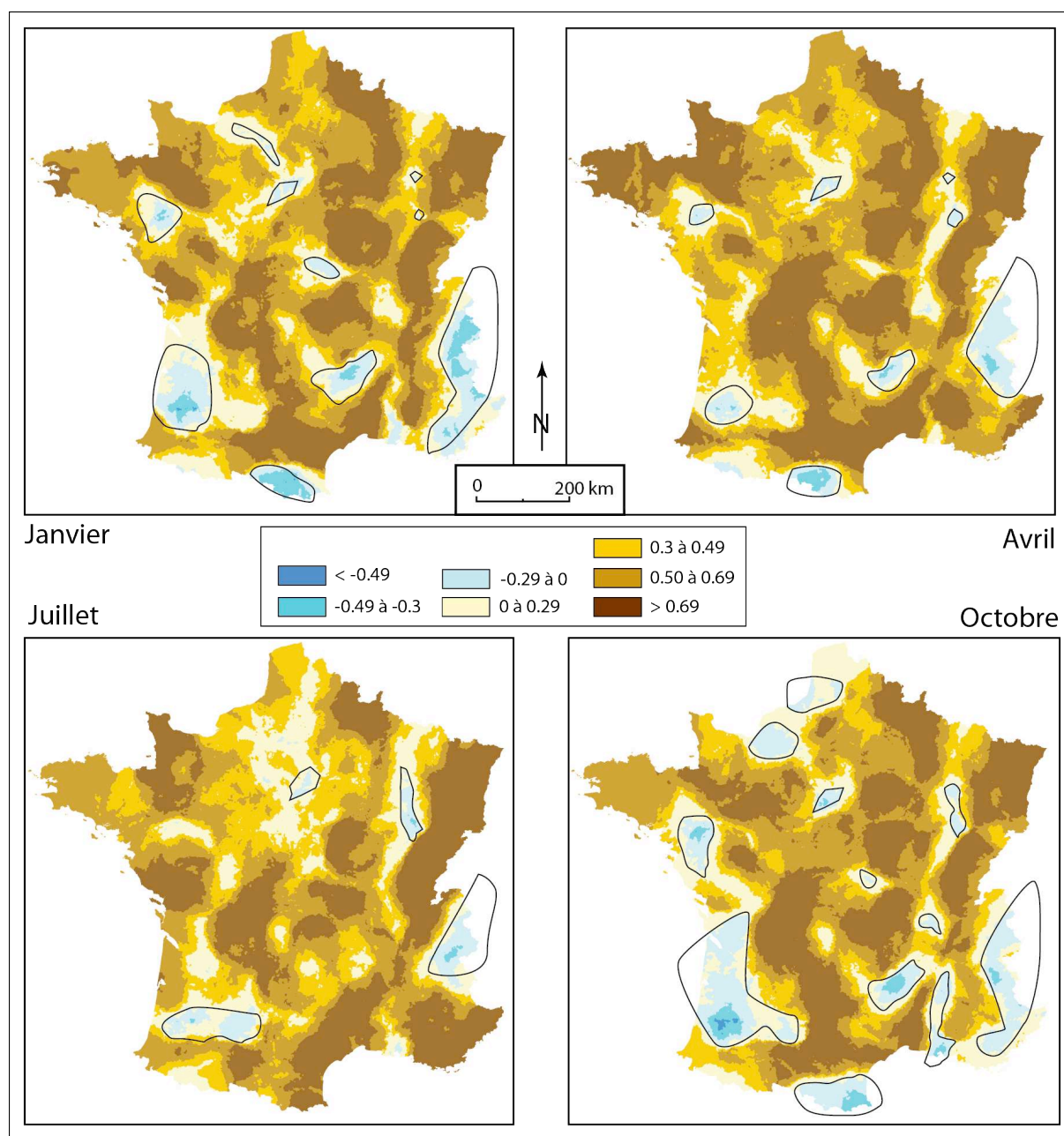


Figure 2 : Variation spatiale du coefficient de la corrélation entre l'altitude et les abats pluviométriques de quatre mois

2.4. Variations du coefficient de régression de l'altitude

Le coefficient de régression est le paramètre qui relie le taux de variation des précipitations en fonction de l'altitude. Il s'agit en fait du gradient pluviométrique vertical qui est très variable selon les lieux : par exemple, dans les Andes, Gonzales-Barrios et Descroix (2000) relèvent qu'il est de 30 mm par 100 m ; en Arctique, au Spitzberg, il est donné à 60 mm/100m par J. Corbel (1970), alors qu'en Belgique, il est seulement de 8,4 mm/100 m selon Alexandre et al. (1998).

La figure 3 nous informe que nous sommes, en France, dans une gamme de gradients centrée sur la valeur observée en Belgique. Le mode est en effet compris entre 2 mm (juillet) à 8 mm (janvier et octobre). Localement, certains gradients peuvent être négatifs. A l'autre bout de la distribution, des valeurs supérieures à 25 mm/100 m peuvent être atteintes, mais elles sont rares.

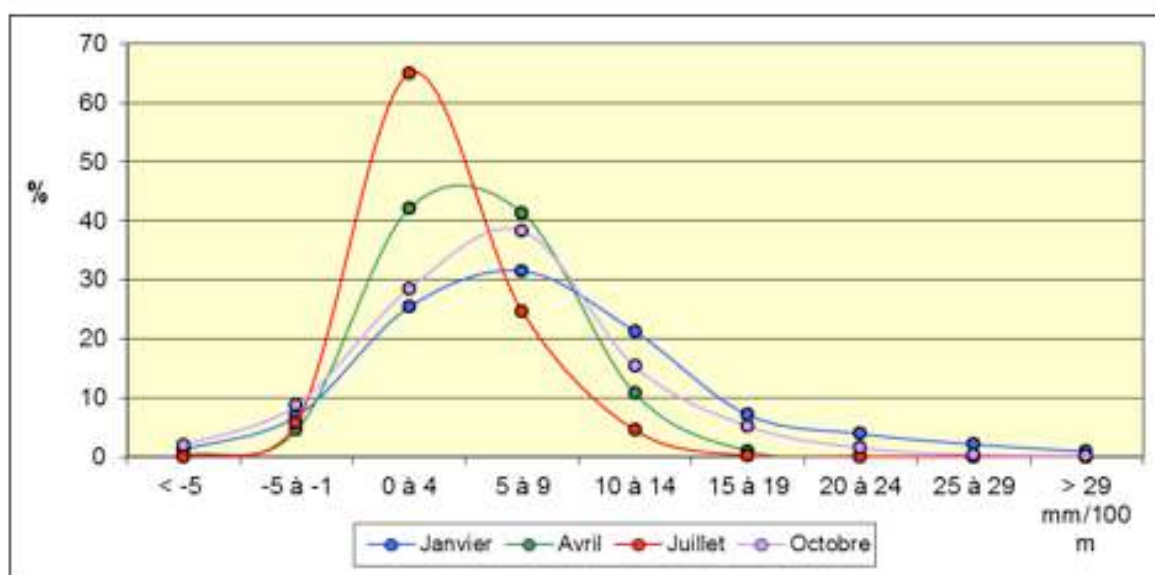


Figure 3 : Variation saisonnière du coefficient de régression de l'altitude

A cette variation saisonnière s'ajoute une variation spatiale montrée par la figure 4. Les gradients négatifs se localisent là où les coefficients de corrélation l'étaient également. Partout ailleurs, il y a augmentation des précipitations avec l'altitude. Les gradients les plus élevés se situent en Bretagne, en Argonne, à l'avant des côtes de Meuse, dans les Vosges du Sud et le Haut-Rhin, la bordure rhodanienne des Cévennes et le Poitou, entre Anjou et les premiers contreforts du massif central (Monts de la Marche). Ces régions se situent le plus souvent en bordure de massifs montagneux modestes, empiétant sur les plaines ou aires d'altitude faible situées à leur contact. Il faut préciser que ces gradients, calculés à partir d'un corpus de 30 stations qui couvrent une surface d'environ 8000 km², sont exacerbés quand le corpus comprend des stations aux abats pluviométriques contrastés. Le cas se produit (par exemple) entre Vosges et Alsace vers Colmar. Précisons enfin que ces régions à fort gradient pluviométrique ne se situent pas forcément là où les coefficients de corrélation sont les plus élevés.

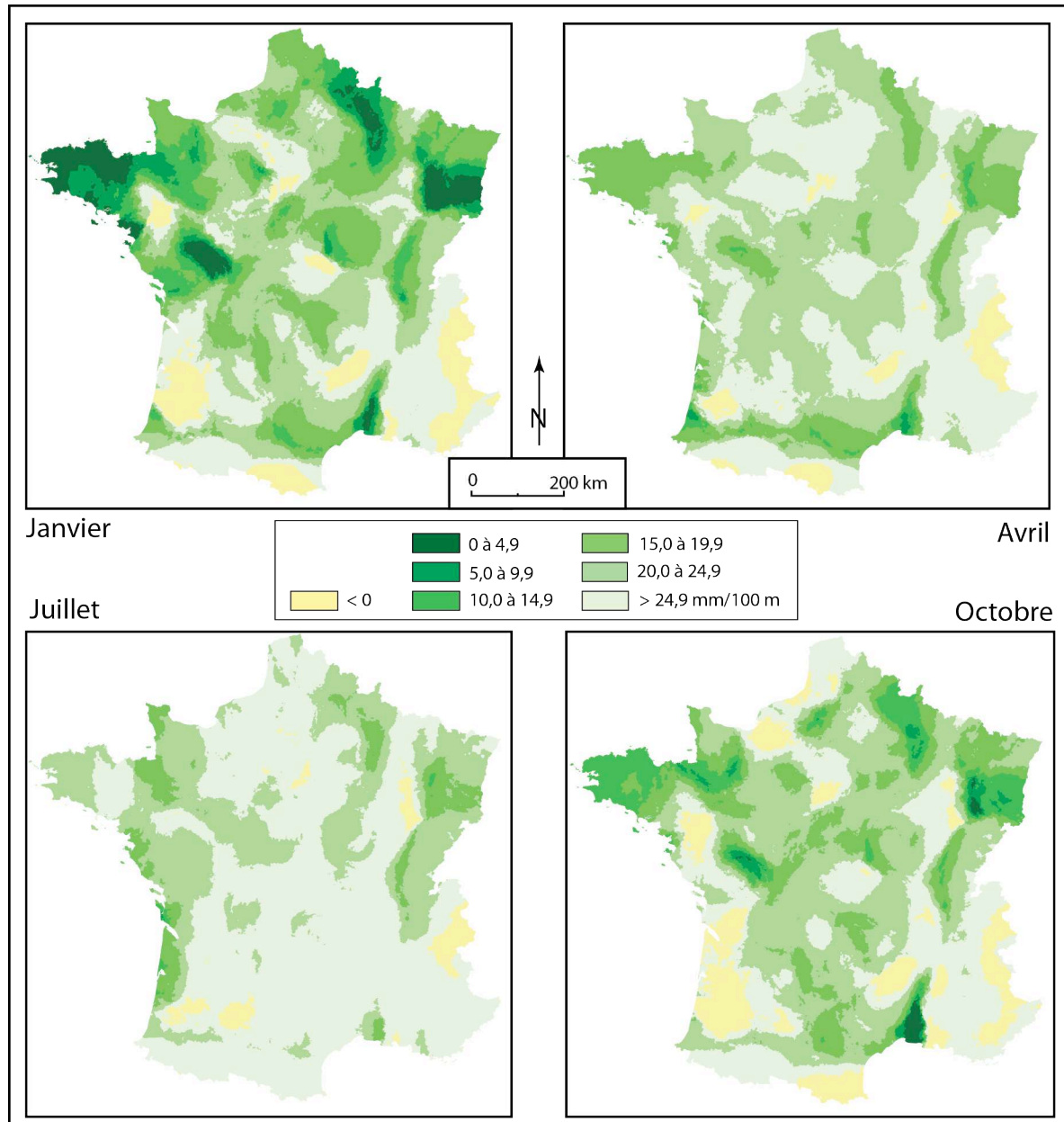


Figure 4 : Variation spatiale du coefficient de régression de l'altitude selon quatre mois

3. DISCUSSION : LE CAS DES COEFFICIENTS DE CORRELATION NEGATIFS

3.1.1. Colinéarités locales

Le cas des coefficients de corrélation négatifs pose problème. Une hypothèse semble pouvoir être avancée pour expliquer ce phénomène. Il s'agit de la colinéarité entre l'altitude et une ou plusieurs autres variables. Ce problème ne devrait pas apparaître car il a été corrigé globalement selon la méthode exposée dans Joly et al. (2009). Mais il est possible que cette correction, calculée, à l'échelle de la France (sur la base des 2031 stations), ne soit pas suffisante et que, dans le détail des régressions locales (30 stations), des colinéarités

apparaissent et biaisent les liaisons statistiques entre altitude et abats mensuels de précipitation.

Vérifier s'il subsiste des colinéarités à échelle locale est simple. Pour ce faire, nous avons établi la corrélation entre l'altitude et les 11 autres variables dans le cadre de trois polygones où la corrélation entre altitude et précipitations est négative et les Vosges, cas inverse (tab. 3). Dans les landes, l'altitude est modérément colinéaire de la distance à la mer (elles partagent 31% de variance) ; en Vendée, l'altitude est également liée à cette variable à laquelle il faut ajouter l'indice de végétation (20% de variance commune). Dans les Alpes, une forte colinéarité lie l'altitude à la distance à la mer (60%) à l'ampleur des creux (36%), au gradient N-S des versants (30%) et à la rugosité (28%). Dans les Vosges, un faisceau de variables sont liées à l'altitude, soit vigoureusement (amplB et pente), soit plus modérément (amplC, rugosité et distance à la forêt). Contrairement aux trois cas précédents, la distance à la mer a une faible colinéarité avec l'altitude.

Tableau 3 : Corrélation entre l'altitude et 9 autres variables pour quatre sites

| | sinus | cosin | amplB | amplC | rugos | pente | IVG | dis-for | dis-mer |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------|----------------|----------------|
| Landes | 0,2 | 0,2 | | 0,3 | 0,33 | -0,17 | 0,27 | 0,12 | 0,56 |
| Vendée | -0,06 | 0 | | -0,28 | 0,26 | 0,16 | 0,44 | 0 | 0,46 |
| Mercantour | -0,27 | 0,54 | 0,35 | -0,62 | -0,53 | -0,25 | 0,2 | 0,1 | -0,77 |
| Vosges | 0,06 | -0,14 | 0,78 | -0,57 | 0,56 | 0,77 | 0,40 | -0,53 | 0,16 |

Tableau 4 : Corrélation entre les précipitations et 10 variables pour quatre sites

| | altit | sin | cos | ampB | ampC | rugos | pente | IVG | d-For | d-mer |
|--------|--------------|------------|------------|-------------|-------------|--------------|--------------|------------|--------------|--------------|
| Landes | -0,50 | -0,41 | -0,14 | | -0,34 | -0,32 | 0,07 | -0,20 | -0,17 | -0,18 |
| Vend. | -0,35 | -0,32 | 0,16 | | -0,42 | -0,04 | 0,13 | -0,02 | -0,29 | -0,40 |
| Merc. | -0,31 | 0,04 | -0,15 | 0,16 | -0,21 | 0,24 | 0,51 | 0,08 | -0,03 | 0,47 |
| Vosges | 0,80 | -0,08 | -0,33 | 0,71 | -0,69 | 0,58 | 0,59 | 0,15 | -0,46 | 0,05 |

Or certaines de ces variables jouent également un rôle non négligeable sur les précipitations. C'est par exemple le cas de la distance à la mer qui explique respectivement 22 et 16 % de la variation spatiale des précipitations dans le Mercantour et en Vendée. Les signes du r de ces deux couples de variables sont de sens contraire en Vendée et dans le Mercantour (en Vendée : $r_{\text{altit_dist-mer}} = +0,46$; et $r_{\text{précip_dist-mer}} = -0,40$; dans le Mercantour, les valeurs sont respectivement de -0,77 et 0,47 ; aussi, dans les deux régions, les précipitations diminuent-elles à mesure que l'altitude augmente). Dans les Vosges, la situation est claire également : les précipitations sont peu abondantes quand l'altitude (accompagnée de son cortège de variables colinéaires : ampleur des bosses faible, ampleur des creux élevés, rugosité et pente faible, distance à la forêt élevée [les forêts se situent en altitude, désertant la plaine cultivée]) est faible). Tout cela montre à l'évidence que l'explication de la baisse des précipitations avec l'altitude peut se trouver là, dans la colinéarité qui lie altitude et les variables colinéaires. Il suffit en effet que (1) les précipitations diminuent et (2) les altitudes augmentent à mesure qu'on s'éloigne de la mer pour que, du même coup, les altitudes soient corrélées négativement aux précipitations : c'est ce qui se produit en Vendée (dans le Mercantour, c'est l'inverse : les

altitudes les plus élevées sont plus proches de la mer que les altitudes faibles tandis que les précipitations augmentent à mesure qu'on s'éloigne de la mer. Mais le résultat est identique : les précipitations diminuent avec l'altitude).

3.1.2. Corrélations partielles

Pour vérifier cette hypothèse, nous avons relancé le calcul des corrélations entre altitude et abats de précipitation après avoir neutralisé les colinéarités locales entre altitude et les 11 autres variables. Pour cela, nous avons appliqué la méthode des corrélations partielles qui permet de contrôler l'effet perturbateur des variables colinéaires de l'altitude sur la relation qui lie cette dernière aux précipitations (Foucart, 2006). La fonction de corrélation partielle (résolue dans le cadre des régressions locales pour chacun des 91 869 polygones) mesure la corrélation entre l'altitude et les abats de précipitations après que la variance commune entre l'altitude et les 11 autres variables explicatives a été supprimée.

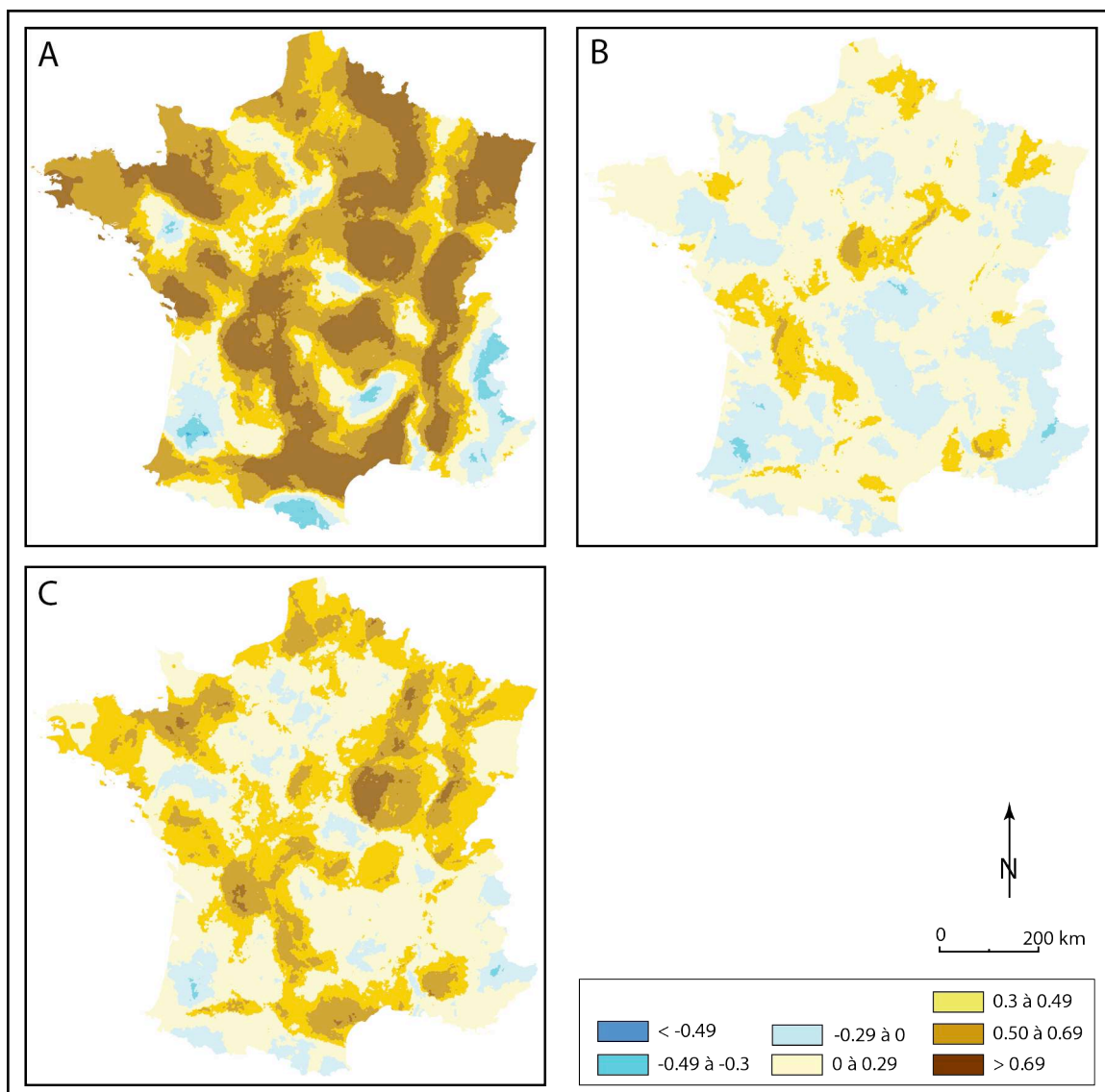


Figure 5 : Variation spatiale du coefficient de la corrélation entre l'altitude et les abats pluviométriques de janvier ; A= corrélations brutes, B=corrélations partielles (influence de 11 variables supprimée, C=corrélations partielles (influence de AmplB et AmplC supprimée).

Les résultats sont intéressants. La figure 5B révèle d'abord que les valeurs des coefficients de corrélation sont beaucoup plus faibles que ceux obtenus des corrélations brutes (absence de corrélation partielle : fig. 5A, fig. 1 de janvier). Les maximums dépassent 0.5 en quelques endroits seulement : marges nord et ouest du Massif central, Lubéron, nord des Vosges, Cambrésis-Thiérache, ...). Si plus aucun r n'est inférieur à -0.5, il subsiste encore des plages dotées de valeurs comprises entre -0.3 et -0.5 (petit secteur du Mercantour et des Landes), mais moins nombreuses et extensives qu'avec les corrélations brutes. En revanche, les corrélations comprises entre -0.3 et 0 occupent plus d'espace. Ces valeurs, modestes pour la plupart, sont surtout gênantes dans les zones montagneuses (Vosges, Jura) où l'on sait qu'une augmentation d'altitude se traduit toujours par une hausse des abats pluviométriques. Ainsi, les corrélations partielles appliquées à l'ensemble des 11 variables n'ont pas supprimé les r négatifs, objectif de ce traitement statistique. Afin d'évaluer quel serait le résultat d'une corrélation partielle incomplète, nous avons répété l'opération en ne supprimant pas la variance commune entre altitude d'une part et AmplB et AmplC d'autre part. La corrélation partielle porte cette fois-ci uniquement sur les 9 variables restantes.

Le résultat (fig. 5C) est plus conforme à l'intuition que nous avons de la relation entre altitude et abats de précipitation. Les coefficients sont nettement plus élevés, ce qui était attendu car les influences de l'ampleur des creux et des bosses sur les abats de précipitation sont ajoutées à celle de l'altitude. Les r inférieurs à 0 sont peu étendus. Les r supérieurs à 0.5 marquent les lieux où la relation entre les abats de précipitation et le complexe altitude, ampleur des creux et des bosses est fort. Ils concernent la partie occidentale des reliefs qui s'étendent du Morvan aux côtes de Meuse, en passant par le plateau de Langres et le Barrois. Une ligne parallèle à la précédente jalonne la bordure ouest du Jura et des Vosges. On retrouve un comportement analogue le long du flanc occidental du Massif central avec des prolongements sur son flanc sud (Minervois-Corbières) en direction de la Provence occidentale (Lubéron, Ventoux). Au Nord, l'Artois et une bonne partie de la Normandie sont concernés par ces coefficients élevés. Toutes ces régions, érigées face aux flux humides, favorisent d'autant plus les précipitations que les bosses, notamment, y sont plus amples. Cela est bien mis en évidence dans les Vosges (tab. 3 et 4).

Toutefois, cette relation entre abats de précipitation et le complexe altitude- amplB - amplC n'existe ni au centre du Massif central, ni dans les Alpes, ni dans les Pyrénées où, pourtant ces trois variables sont exacerbées ; c'est même plutôt l'inverse qui s'y produit. C'est un véritable problème auquel, pour l'heure, nous n'avons pas trouvé d'explication.

Conclusion

La méthode des régressions locales offre la possibilité de cartographier les variations spatiales du coefficient de corrélation qui mesure la dépendance de toute variable explicative disponible (altitude, pente-sinus-cosinus des versants, ampleur des bosses et des creux, distance à la mer, à la forêt, ...) à chaque variable d'intérêt (précipitation, température, ...) connue en un certain nombre de stations d'observation. Nous avons traité les relations statistiques existant entre 12 variables explicatives et les abats de précipitation connus grâce à 2031 stations climatiques localisées en France continentale. Ce type de cartographie est rendu possible du fait que l'espace est segmenté en plus de 90000 polygones qui se rapportent à un corpus de 30 stations voisines (elles-mêmes caractérisées par les 12 variables explicatives et les abats pluviométriques). Une régression est opérée pour chaque polygone, ce qui permet d'obtenir plus de 90 coefficients de corrélation et de régression dispersés sur l'ensemble du territoire.

L'altitude, la profondeur des creux et la distance à la forêt sont les trois variables majeures expliquant la variation des abats pluviométriques. Elles expliquent plus de 10% de la variance des précipitations pour respectivement 80, 44 et 49% des espaces de France continentale. La rugosité topographique, la pente et l'ampleur des bosses expliquent plus modérément les précipitations. Par ailleurs, nous avons montré la concordance qui existe entre l'extension spatiale des facteurs ayant une influence sur les précipitations (reliefs d'importance, vallées suffisamment profondes) et celle où les précipitations sont influencées par eux. La plus faible fréquence avec laquelle AmplB (13%) explique les précipitations par rapport AmplC (44%) ne peut donc pas être expliqué par l'importance moindre que la première variable aurait sur les précipitations.

Devant l'écrasante majorité des corrélations positives qui lient l'altitude aux abats pluviométriques, le cas des corrélations négatives, et surtout celles qui sont inférieures à -0.3, pose problème. Ces corrélations négatives traduisent une décroissance des abats pluviométriques à mesure que l'altitude augmente. On a émis l'hypothèse qu'elles pouvaient être dues à des colinéarités que l'altitude entretient avec une ou plusieurs autres variables. Les corrélations partielles qui ont été utilisées pour corriger ce biais ont bien souligné les lieux où la relation entre abats pluviométriques et altitude (dégagée de toute colinéarité) est la plus forte, mais elles n'ont pas permis de supprimer r négatifs, même si les valeurs $< -0,5$ sont beaucoup plus rares. Il n'a pas été possible de savoir quel est le processus spatial qui conduit à un tel comportement. On pourrait, par exemple, faire appel à la localisation préférentielle de la forêt dans les altitudes basses pour l'expliquer pour expliquer cette tendance surprenante d'une baisse des précipitations avec la hausse des altitudes. Mais la colinéarité de cette variable avec l'altitude ayant été neutralisée, cette hypothèse ne tient pas. Il n'est pas possible d'en dire plus compte tenu des informations dont nous disposons. Peut-être cette relation contre intuitive est-elle due à des caractéristiques non prises en compte dans le modèle ou à l'effet d'une variable cachée captée par l'altitude. Pour pallier ce problème, on pourrait, à l'aide d'un modèle logistique, tester, pour chacune des variables explicatives prises en compte, si les différences observées selon l'altitude sont significatives ou non, afin de mettre à jour d'éventuelles particularités propres aux altitudes. Nous n'avons pas appliqué ce test qui nous aurait entraînés au-delà de la problématique de cet article. Mais des recherches en ce sens mériteraient d'être poursuivies.

Ce qui est vrai pour l'altitude l'est pour les 11 autres variables qui, entre elles présentent également des colinéarités. Aussi l'identification des variables qui jouent un rôle sur la variation spatiale des abats pluviométriques et la quantification de cette influence sont délicates. Il serait en ce sens souhaitable de recourir à des méthodes de type PLS qui présentent l'avantage de réduire le nombre de variables explicatives en construisant de nouvelles variables qui correspondent à la combinaison linéaire de plusieurs variables explicatives initiales. Cela nous permet d'introduire le fait qu'il est peut-être illusoire de vouloir à tout prix quantifier le gradient pluviométrique d'une variable particulière indépendamment des autres. Car ce qui, dans la plupart des cas, joue un rôle sur l'augmentation des abats pluviométriques, c'est le cortège de toutes les caractéristiques des lieux : altitude au premier chef, mais également pente, profondeur des creux et des bosses, biomasse, etc. Nous l'avons montré avec le triplet altitude, ampleur des bosses et des creux : la carte des coefficients de corrélation partielle de l'altitude après que l'influence apportée sur cette dernière par les 11 autres variables a été supprimée (fig. 4B) est moins informative que la carte des coefficients de corrélation partielle de l'altitude où l'influence de l'ampleur des bosses et des creux est conservée (fig. 4C). C'est donc bien le contexte environnemental perçu dans l'ensemble des variables qui le composent qui doit être pris en compte. L'altitude est ainsi une variable « synthétique » qui, colinéaire avec d'autres variables, capte l'influence

significative apportée par ces dernières sur les précipitations. C'est pourquoi elle explique les précipitations presque partout et avec une intensité élevée.

Bibliographie

- ALEXANDRE J., ERPICUM M., MABILLE G., CORNET Y. (1998). « Précipitations atmosphériques et altitude. Prélude à une cartographie des montants annuels et mensuels en Belgique ». *Publications de l'Association internationale de Climatologie*, vol. 11, pp. 219-226.
- BENICHO P., LEBRETON O. (1987). « Prise en compte de la topographie pour la cartographie des champs pluviométriques statistiques ». *La météorologie*, 7ième série, vol. 19, p. 23-34.
- BOUBAKER H.B., GAMMAR A.M. (2002). « Proposition d'un indicateur de continentalité/maritimé pour l'estimation et la cartographie des paramètres climatiques : application à la pluviométrie de la Tunisie du Nord ». *Publications de l'Association internationale de Climatologie*, vol. 14, p. 263-270.
- CARREGA P., GARCIA E., (2000). « Les fortes précipitations quotidiennes en Toscane et leur cartographie ». *Publications de l'Association internationale de Climatologie*, vol. 13, p. 168-180.
- CARREGA P. (2003). « Le climat aux échelles fines ». *Publications de l'Association internationale de Climatologie*, vol. 15, p. 19-30.
- CORBEL J. (1970). « Le Spitsberg, présentation géographique ». *Spitsberg, mission française 1966*, ed. du CNRS, service de documentation et de cartographie géographiques, mémoires et documents, année 1970-nouvelle série, vol. 10, pp. 23-35.
- CREECH T.G., MCNAB A.L. (2002). « Using NDVI and elevation to improve precipitation mapping ». In *13th Conference on Applied Meteorology*, 13-16 May 2002. American Meteorological Society.
- FOUCART T, 2006. Colinéarité et regression linéaire. *Mathématiques et Sciences humaines*, vol. 173, n°1, pp. 5-25.
- FOUCHIER C., LAVABRE J., GREGORIS Y., Sol B. (2004). « Prédétermination régionale des pluies d'occurrence fréquente à exceptionnelle. Application au pourtour méditerranéen français ». *Annales de l'Association Internationale de climatologie*, vol1, p. 33-44.
- FURY R., JOLY D. (1995). « Interpolation spatiale à maille fine des températures journalières ». *La Météorologie*, n°11, p.36-43.
- GONZALES-BARRIOS J.L., DESCROIX L. (2000). « Bilan et perspectives de la ressource en eau dans le bassin du Nazas-Aguanaval (Nord-Mexique) ». *Revue de géographie Alpine*, n°2, pp. 115-128.
- HUMBERT J., DROGNE G., MAHR N. (1998). « Cartographie des précipitations par paramétrisation omnidirectionnelle du relief : la méthode pluvia ». *Publications de l'Association internationale de Climatologie*, vol. 11, p. 259-266.
- JOLY D., 2007. L'information géographique au service de la climatologie. Chapitre 1. *Information géographique et climatologie*. Carrega P., Paris : Hermès science ; Lavoisier (Traité IGAT - Information géographique et aménagement du territoire. Aménagement et gestion du territoire). 23-72.
- JOLY D., BOIS B., ZAKSEK K., 2009. Hiérarchie des facteurs topographiques explicatifs de la variation spatiale des températures et des précipitations selon différentes échelles. Actes des *Journées de climatologie de la commission "Climat et Société" du CNFG, Climat et Relief*, Besançon, 13 mars 2009. 25-34.
- http://thema.univ-fcomte.fr/paysage-eco/rap-pdf/CNFG_Bes_DanielJoly.pdf

- JOLY D., NILSEN L., FURY R., ELVEBAKK A., BROSSARD T., 2003. Temperature interpolation at a large scale; test on a small area in Svalbard. *International Journal of Climatology*, vol. 23, pp. 1637-1654.
- JOLY D., BROSSARD T., CARDOT H., CAVAILHÈS J., HILAL M., WAWRESKY P. (2008a). «Densité des points de mesure, types et limite des modèles d'interpolation». *Journées de climatologie, Grenoble, 22-23 mars 2007 ; climat et société : mesures et modèles*, publication dans les actes, p. 49-65.
- JOLY D., BROSSARD T., CARDOT H., CAVAILHÈS J., HILAL M., WAWRESKY P., 2009. Interpolation par régressions locales : application aux précipitations en France. *L'Espace géographique*, 38(2) : 157-170.
- LABORDE J.P., TRABOULSI M. (2002). «Cartographie automatique des précipitations : application aux précipitations moyenne annuelles du Moyen-Orient». *Publications de l'Association internationale de Climatologie*, vol. 14, p. 296-303.
- NINYEROLA M., PONS X., ROURE J.M. (2000). "A methodological approach of climatological modelling of air temperature and precipitation through GIS techniques". *International Journal of Climatology*, vol. 20, n°14, p. 1823-1841.
- ZAHAR Y., LABORDE J.P. (2000). « Les précipitations journalières extrêmes de Tunisie : cartographie des gradex et valeurs exceptionnelles ». *Publications de l'Association internationale de Climatologie*, vol. 13, p. 181-190.